第36卷 第14期 计 算 机 工 程 2010年7月
Vol.36 No.14 Computer Engineering July 2010
·网络与通信· 文章编号：1000—3428(2010)14—0102—03 文献标识码：A 中图分类号：TP393

# WSN中基于能量的分布式覆盖控制算法

陈 白，杜 硕，刘 彬，郝晓辰
(燕山大学电气工程学院，秦皇岛 066004)

**摘 要：**针对无线传感器网络中节点密度过大、节点剩余能量不均等问题，设计一种基于节点剩余能量的分布式覆盖控制算法，基于概率覆盖模型，按目标区域内节点剩余能量从小到大的顺序，依次通过计算各个节点的区域覆盖概率判定其冗余性，并使冗余节点转入休眠状态。仿真结果表明，该算法能有效降低网络中节点冗余度，延长网络生存时间。

**关键词：**无线传感器网络；覆盖控制；区域覆盖概率；剩余能量

# Distributed Coverage Control Algorithm Based on Energy in Wireless Sensor Networks

**CHEN Bai, DU Shuo, LIU Bin, HAO Xiao-chen**
(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

**【Abstract】** According to the too high density of nodes in Wireless Sensor Networks(WSN) and imbalanced energy consumption of nodes, a distributed coverage control algorithm based on energy(DCCABE) is proposed. This algorithm is based on probabilistic coverage model and computes the area coverage probability of nodes to judge the redundancy according to the sequences which are arranged by the remain energy of nodes and changes the redundant nodes into sleeping state. Simulation results show that DCCABE can effectively reduce the redundancy of nodes and prolong the network lifetime.

**【Key words】** Wireless Sensor Networks(WSN); coverage control; area coverage probability; remain energy

## 1 概述

随着MEMS技术、嵌入式处理技术和无线通信技术的发展，无线传感器网络以其特有的优点，受到人们越来越多的关注。在实际应用中，如何部署节点，使无线传感器网络的空间资源得到优化，是无线传感器网络研究中的重要问题之一。覆盖控制是解决此问题的有效方法。

针对覆盖控制问题，人们提出了一些算法和模型。文献[1]提出了一种利用节点覆盖冗余来延长网络生存时间的覆盖控制算法；文献[2]提出了一种基于Voronoi图的分布式覆盖协议，通过Voronoi划分来判断无线网络中传感器节点的冗余性。然而上述算法所采用的覆盖模型均为布尔模型。在实际环境中，处在节点感知范围内的点并不一定能够被该节点感知；文献[3]提出了一种基于概率模型的覆盖控制算法BPCMDC，通过对网络覆盖概率的计算来判定节点的冗余性。

本文基于概率覆盖模型，综合考虑网络的覆盖性能和节点剩余能量，设计了一种覆盖控制算法(DCCABE)。

## 2 基于概率覆盖模型的冗余节点的判定

传感器节点集 $S(S=\{s_1,s_2,\cdots,s_N\})$ 中的各个节点随机部署在目标区域 $R$ 上，并保证 $R$ 上的任意点都处于 $S$ 中至少一个节点的感知范围内。任意节点 $s_i$ 以 $r$ 为感知半径，能够感知面积为 $\pi r^2$ 的圆盘区域 $A_i$。

**定义1**(感知邻居和感知邻居闭集) 如果 $A_i\cap A_j\neq\varnothing, i\neq j$，称节点 $s_i$ 和 $s_j$ 互为感知邻居(本文所指的邻居节点均为感知邻居节点)；由节点 $s_i$ 及其所有感知邻居节点组成的集合 $s_{in}$，称为 $s_i$ 的感知邻居闭集，记做 $S_{in}=\{s_1,s_2,\cdots,s_i,\cdots,s_n\}$。

**定义2**(覆盖空洞) 如果目标区域中存在任意点 $p$，且点 $p$ 不处在任何节点感知范围内，称此点为覆盖空洞。

在实际环境中，由于噪声干扰以及信号衰减，节点感知能力表现出一定的不确定性，对此文献[4]提出了一种概率覆盖模型，将节点 $s_i$ 对 $R$ 内任意点 $p(x_p, y_p)$ 的覆盖概率定义为

$$c_{x_p y_p}(s_i)=\begin{cases}0 & \text{if } r+r_e\le d(s_i,\ p)\\ \mathrm{e}^{-\lambda\alpha^{\beta}} & \text{if } r-r_e<d(s_i,\ p)<r+r_e\\ 1 & \text{if } r-r_e\ge d(s_i,\ p)\end{cases} \tag{1}$$

其中，$c_{x_p y_p}(s_i)$ 表示点 $p$ 被节点 $s_i$ 覆盖的概率；$d(s_i,p)$ 表示节点 $s_i$ 与点 $p$ 的欧氏距离，其数学表达式为 $d(s_i,p)=\sqrt{\left(x_p-x_{s_i}\right)^2+\left(y_p-y_{s_i}\right)^2}$；参数 $\alpha=d(s_i,\ p)-(r-r_e)$，$r_e(r_e<r)$ 是反映节点感知能力不确定性的参量，由传感器硬件决定；当 $d(s_i,\ p)>r_e$ 时 $c_{x_p y_p}(s_i)$ 会受到参数 $\lambda$ 和 $\beta$ 的影响，$\lambda$ 和 $\beta$ 均由传感器的物理特性决定。

依据式(1)和概率的求和特性，当 $p(x_p,\ y_p)\in A_i, i=1,2,\cdots,k$ 时，点 $p$ 同时被节点 $s_1, s_2, \cdots, s_k$ 覆盖的概率表示为

$$c_{x_p y_p}(S_k)=1-\prod_{s_i\in S_k}(1-c_{x_p y_p}(s_i)) \tag{2}$$

其中，$S_k=\{s_1,s_2,\cdots,s_k\}$。

**基金项目：**燕山大学博士基金资助项目(B452)

**作者简介：**陈 白(1981－)，女，硕士，主研方向：无线传感器网络协议；杜 硕，硕士研究生；刘 彬，教授、博士生导师；郝晓辰，讲师、博士

**收稿日期：**2010-01-20 **E-mail：**haoxiaochen@ysu.edu.cn

如果节点 $s_i$ 为冗余节点，当其转入休眠状态后，不会影响整个网络对 $R$ 完全覆盖，并会降低网络的节点密度和数据的冗余性，所以，如何判定节点冗余性是实现覆盖控制算法的首要问题。本文利用区域覆盖概率进行判定。

任意节点 $s_i \in S$，其 $A_i$ 由 $m(x_m,y_m), n(x_n,y_n),\cdots$ 等无数点组成，$s_i$ 的感知邻居闭集 $s_{in}$ 中的全部节点对 $A_i$ 内 $m(x_m,y_m), n(x_n,y_n),\cdots$ 等所有点的覆盖概率依次记为 $c_{x_m y_m}(S_{in}), c_{x_n y_n}(S_{in})\cdots$。为简化计算，采用近似方法，将 $A_i$ 中的点用 $n$ 个子区域(记做$\{a_1,a_2,\cdots,a_n\}$)进行量化，对于子区域的划分如图 1 所示，在 $A_i$ 上划分若干间隔相等的正方形网格，这些网格与 $A_i$ 的边界组成了感知区域的子区域。如果保证子区域 $a_i$ 划分的足够小，就可以将 $a_i$ 中心点的覆盖概率近似为 $a_i$ 的覆盖概率 $c_{area}(a_i)$。假设 $a_i$ 的中心点为 $i(x_i,y_i)$，则有：

$$c_{area}(a_i) = c_{x_i y_i}(S_{in}) \tag{3}$$

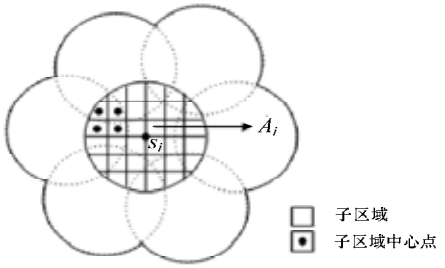


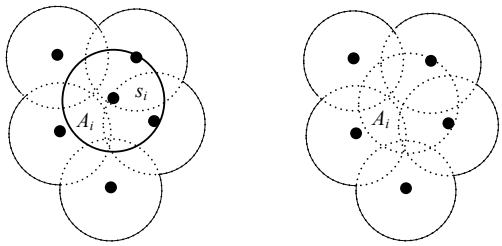

**图 1　节点 $s_i$ 的覆盖区域的网格划分**

**定义 3** (区域覆盖概率)：$A_i$ 上的区域覆盖概率 $c_{area}(A_i)$ 是指 $A_i$ 内所有子区域覆盖概率中的最小值，其表达式为

$$c_{area}(A_i) = \min\{c_{area}(a_1), c_{area}(a_2),\cdots,c_{area}(a_n)\} \tag{4}$$

冗余判定规则：如果 $s_i$ 转入休眠状态后，$A_i$ 上的区域覆盖概率 $c_{area}(A_i)$ 不为 0，则 $s_i$ 是冗余节点；否则，$s_i$ 不是冗余节点。

如：节点 $s_i \in S$ 的感知区域为 $A_i$，其感知邻居闭集为 $S_{in}$，当 $s_i$ 处于工作状态时，$A_i$ 的覆盖情况受到 $S_{in}$ 中的节点的共同影响，如图 2(a)所示。当 $s_i$ 转入休眠状态后，如图 2(b)所示，如果 $c_{area}(A_i) \neq 0$，则说明 $A_i$ 上没有出现覆盖空洞，$s_i$ 转入休眠状态并未影响整个网络对目标区域实现完全覆盖，所以 $s_i$ 为冗余节点。




(a)$s_i$ 工作时 $A_i$ 的覆盖情况　　(b) $s_i$ 休眠时 $A_i$ 的覆盖情况

**图 2　$s_i$ 的冗余判定**

## 3　DCCABE 算法

DCCABE 算法的设计基于以下假设：

(1)每个节点都已知自己的位置信息；

(2)每个节点都已知自己的剩余能量；

(3)每个节点在向周围节点发送消息时，通信半径 $r_c \geq 2(r+r_e)$，以保证任意节点发出的消息能被其所有感知邻居获得[5]。

DCCABE 算法主要分为 2 个阶段：邻居发现阶段和覆盖集构建阶段。

(1)邻居发现阶段

网络中所有节点处于工作状态，各节点依次以 $r_c$ 为发射半径广播 HELLO 消息，其中包含节点自身 ID、位置信息、剩余能量和状态标识(对于尚未进行冗余判定的节点，状态标识初始值为 0)。收到 HELLO 消息的节点建立自己的感知信息列表 SIL，将其所有感知邻居的信息储存到列表中，SIL 格式如图 3 所示。

| ID | CO | RE | SM |
|---|---|---|---|

**图 3　节点 $s_i$ 的感知信息列表($SIL(s_i)$)**

其中，ID 表示节点在网络中的标识；CO 表示节点位置信息；RE 表示节点当前剩余能量；SM 表示节点状态标识。

任意节点 $s_i \in S$ 在 $SIL(s_i)$ 建立完闭后，将自身各项信息也对应写入列表，之后按照剩余能量从小到大的顺序对 $SIL(s_i)$ 中的节点进行排列。如果存在多个节点剩余能量相同的情形，则按照 ID 升序排列。邻居发现阶段的程序伪代码如下：

```
1：each node  s_j ∈ S  broadcasts HELLO with  r_c
2：for(each node  s_j ∈ S )do
3：    while(receives HELLO from  s_j ∈ S )do
4：      establishes SIL(s_i) as follows：
5：          SIL(s_i) ← ID(s_j) ； SIL(s_i) ← CO(s_j)
           SIL(s_i) ← RE(s_j) ； SIL(s_i) ← SM(s_j)
6：    end while
7：    inserts the information of s_i into SIL(s_i)
8：    updates the sequence of the nodes in SIL(s_i)：
9：    if( RE(s_j) > RE(s_k) )do
10：     s_k  checks the redundancy ahead of  s_j
11：   else if( RE(s_j) = RE(s_k)  &  ID(s_j) > ID(s_k) )do
12：     s_k checks the redundancy ahead of  s_j
13：   end if
14：end for
```

(2)覆盖集构建阶段

网络中所有节点都要对自身冗余性进行判定，节点执行冗余性判定的顺序取决于前一阶段建立的感知信息列表。若任意节点 $s_m \in S$ 在 $SIL(s_m)$ 中的排序为 1，则依据冗余判定规则，求出 $A_m$ 上的区域覆盖概率值 $c_{area}(A_m)$，并执行下列判断：

**Case 1** 若 $c_{area}(A_m) \neq 0$，则 $s_m$ 确定自身为冗余节点，在广播一条表示其为冗余节点的 REDUNDANCY 信息(其中包含节点自身 ID)后转为休眠状态。所有收到 $s_m$ 的 REDUNDANCY 消息的节点对自身信息列表进行修改：将 $s_m$ 的相应信息从列表中删除。

**Case 2** 若 $c_{area}(A_m) = 0$，则 $s_m$ 确定自身为非冗余节点，其继续保持工作状态并广播一条表示其为工作节点的 ACTIVE 消息(其中包含节点自身 ID)。所有收到 $s_m$ 的 ACTIVE 消息的节点对自身信息列表进行修改：将 $SM(s_m)$ 置为 1，这是为了区分节点是否已经判定过冗余性，避免重复判定。

对于在自身信息列表中排序不为 1 的任意节点 $s_m \in S$，不妨假设其排序为 $n$，则在收到 $SIL(s_m)$ 中排序为 $n-1$ 的节点广播的 REDUNDANCY 或 ACTIVE 消息后，其对自身进行冗余判定，过程同上。最终，所有工作节点构成网络覆盖集。覆盖集构建阶段的程序伪代码如下：

1：for(each node $s_m \in S$ )do
2： checks the sequence of $s_m$ in $SIL(s_m)$
3： if( $SM(s_m)=0$ & the sequence of $s_m$ is 1)do
4： if( $c_{area}(A_m) \neq 0$ )do
5： $s_m$ sends REDUNDANCY and then turns off
6： if( $s_n \in S$ receives REDUNDANCY from $s_m$ )do
7： $s_n$ deletes the information of $s_m$
8： end if
9： else do
10： $s_m$ sends ACTIVE and goes on working
11： if( $s_n \in S$ receives ACTIVE from $s_m$ )do
12： $SM(s_m)=1$
13： end if
14： end if
15： else if( $SM(s_m)=0$ & the sequence of $s_m$ is n & n>1)do
16： the sequence of $s_u$ is n-1
17： $s_m$ checks the redundancy after it receives ACTIVE/REDUNDANCY from $s_u$
18： end if
19：end for

## 4 仿真结果与性能分析

假设目标区域 $R$ 是一个 1 000 m×1 000 m 的矩形区域，概率覆盖模型中的参数 $\lambda=0.5$, $\beta=1$，节点通信半径 $r_c=250$ m，感知半径 $r=80$ m, $r_e=45$。

**仿真 1** 在 $R$ 上随机部署的节点数依次为 100, 150, …, 500。执行 DCCABE 算法，分别求取在不同节点密度下工作节点和冗余节点的个数。

从图 4 可知，随着节点总数的增加，工作节点数发生了小幅变化，但基本稳定在 75~85，接近于一个常量，说明通过 DCCABE 算法构造的覆盖集在 $R$ 不发生变化的情况下，基本不受节点密度的影响。

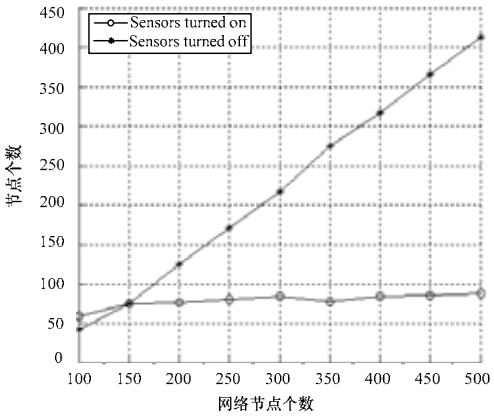



**图 4 随节点数增加工作节点和休眠节点数的变化情况**

**仿真 2** 比较 DCCABE 算法和 BPCMDC 算法的性能。节点数依次取为 100, 150, …, 500，在 $R$ 不变的情况下，随着节点总数增多，对分别按 2 种算法求得的覆盖集中工作节点数进行比较。

从图 5 可知，虽然 DCCABE 算法在节点密度较小时求得的覆盖集中工作节点数比 BPCMDC 算法求得的工作节点数多，但随着节点个数增加，DCCABE 算法求得的工作节点数变化不大，而 BPCMDC 算法求得的工作节点数显著增加。

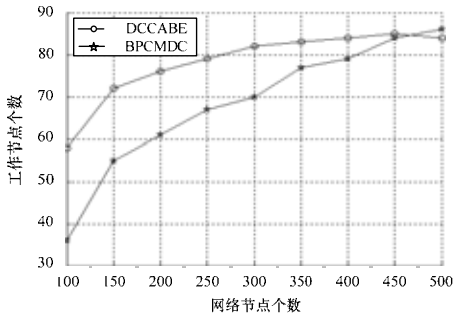



**图 5 工作节点个数**

图 6 为在 $R$ 不变的情况下，随着节点总数增多，2 种算法求得的覆盖集中高能节点占节点总数百分比的比较，高能节点是指：如果某节点的剩余能量高于其感知邻居闭集中节点剩余能量的平均值，则称此节点为高能节点。

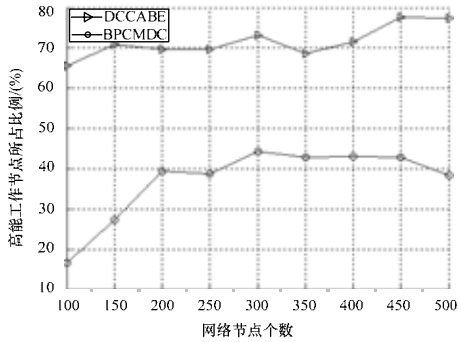



**图 6 高能工作节点所占比例**

从图 6 可知，DCCABE 算法求得的覆盖集中高能节点个数所占百分比始终稳定在 70%左右，远远高于 BPCMDC 算法。让尽量多高能节点工作，能避免网络过早出现覆盖空洞，有利于平衡节点能耗，从而延长网络生存时间。

## 5 结束语

本文提出了一种基于概率模型的覆盖控制算法(DCCABE)。该算法的特点如下：(1)算法为分布式算法，避免因获取全局信息而导致的节点间信息交换次数过多；(2)节点根据按照剩余能量大小排列的顺序进行冗余判定，有利于平衡节点能耗。但是本文并未讨论通信半径 $r_c<2(r+r_e)$ 的情况，这将是下一步的研究方向。

## 参考文献


[1] Slijepcevic S. Power Efficient Organization of Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE Communications Society. Helsinki, Finland: IEEE Press, 2001.

[2] 蒋 杰, 方 力. 无线传感器网络最小连通覆盖集问题求解算法[J]. 软件学报, 2006, 17(2): 175-184.

[3] 柳立峰, 邹仕洪, 等. 基于概率覆盖模型的无线传感器网络密度控制算法[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(4): 14-17.

[4] Zou Yi. Sensor Deployment and Target Localization in Distributed Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2004, 3(1): 61-91.

[5] 屈玉贵, 蔺智挺. 无线传感器网络的 WPCS 覆盖策略[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 767-770.


编辑 金胡考